

УДК 553.041

SEDEX Deposits are the Most World Important Source of Zn, Pb and Ag. Brief World Review. The Main Geological Features. Prospects of Russia and Krasnoyarsk Region

Konstantin V. Lobanov^{*a} and Victor V. Nekos^b

^a*Orsu Metals Corp.*

9 Narodnaya Str., Moscow, 115172, Russia

^b*“Krasnoyarskgeologiya”*

62 Karla Marksa Str., Krasnoyarsk, 660049, Russia

Received 20.07.2017, received in revised form 14.09.2017, accepted 08.10.2017

Nowadays the SEDEX deposits are the main world source of Zn (Pb, Ag). The ores of these deposits are complex and beside two main minerals: Zn and Pb, they have got Ag, Au, Cd, In, Cu, Sn, Sb, Bi, Se, Te which are extracted simultaneously. About 132 of SEDEX-type deposits are known in the world now. They are spread rather irregularly and there are several regions of their development according to their resources. The biggest Russian strata-bound Pb-Zn deposits in the clastic and clastic-carbonat rocks of “Siberian polymetallic belt” are similar to SEDEX deposits and they belong to the giant (more then 10 Mt Zn+Pb) deposits. On the territory of Russia the main prospects for discovery of the SEDEX deposits are connected with fold frame of the Siberian platform. Nowadays five areas with good prospects are known in the frame of the Siberian platform: North-Pribaikalsky, West-Verkhoyansky, Angaro-Yeniseisky, Taimyrozersky and East-Sayansky, the latest three of them being in Krasnoyarsk region.

Keywords: SEDEX deposits, arrangement, main features, prospects of Russia, Siberian polymetallic belt.

Citation: Lobanov K.V., Nekos V.V. SEDEX deposits are the most world important source of Zn, Pb and Ag. brief world review. The main geological features. Prospects of Russia and Krasnoyarsk region, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(7), 881-907. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-7-881-907.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: klobanov@yandex.ru

Месторождения типа SEDEX – важнейший источник Zn, Pb и Ag в мире. Краткий мировой обзор. Перспективы России и Красноярского края

К.В. Лобанов^а, В.В. Некос^б

^аOrsu Metals Corp.

Россия, 115172, Москва, ул. Народная, 9

^бОАО «Красноярскгеология»

Россия, 660049, Красноярск, ул. Карла Маркса, 62

Главным источником цинка (свинца, серебра) в мире являются месторождения типа SEDEX (Sedimentary Exhalative). Руды этих месторождений комплексные, и помимо двух главных металлов – Zn и Pb – в них содержатся Ag, Au, Cd, In, Cu, Sn, Sb, Bi, Se, Te, которые извлекаются в качестве попутных компонентов. В мире на сегодня известно около 132 месторождений типа SEDEX, которые распространены довольно неравномерно, и по количеству сосредоточенных в них запасов выделяются несколько основных районов их развития. В России три крупнейших по запасам стратиформных Pb-Zn месторождений в терригенных и терригенно-карбонатных толщах Сибирского полиметаллического пояса – Холоднинское, Горевское и Озерное – являются близкими аналогами месторождений SEDEX и входят в группу месторождений «мирового класса» (запасы Zn+Pb более 10 млн т). На территории Российской Федерации наибольшие перспективы для выявления месторождений SEDEX связаны со складчатым обрамлением Сибирской платформы. В настоящее время здесь известно пять перспективных районов: Северо-Прибайкальский, Западно-Верхоянский, Ангара-Енисейский, Таймыроозерский и Восточно-Саянский, причем три последних находятся в Красноярском крае.

Ключевые слова: месторождения SEDEX, распространенность, основные черты, перспективы России, Сибирский полиметаллический пояс.

Введение

Минерально-сырьевая база любой страны, наряду с другими природными ресурсами, служит основой ее экономического самостоятельности, и с каждым годом ее значение неуклонно возрастает. Многие полезные ископаемые имеют стратегическое значение, месторождения часто становятся градообразующими, а наиболее крупные из них формируют социально-экономический облик целых регионов. Более того, экономика целых стран, таких как Канада, Австралия и ЮАР, успешно развивается в основном именно благодаря богатству своих недр и умению их эффективно использовать. И на территории России множество таких примеров: Урал, Магаданская область и Чукотка, Рудный Алтай, Забайкалье и др. В Красноярском крае ярчайший таким примером является Норильский горнорудный район. Однако не стоит забывать, что любое месторождение имеет конечные запасы и рано или поздно будет отработано. Поэтому всегда существует потребность в выявлении новых месторождений, и, что самое главное и приятное, они периодически находятся. В качестве примера следует вспомнить относительно недавнее открытие на юге края, в сравнительно хорошо изученном районе, Кингашского Cu-Ni месторождения. В этой статье речь пойдет о перспективах выявления на территории России и Красноярского края, в частности, стратиформных Ag-Pb-Zn-месторождений в

терригенных и терригенно-карбонатных толщах (тип SEDEX), которые являются важнейшим мировым источником Zn, Pb и Ag.

Общая геолого-экономическая информация

По данным International Lead and Zinc Study Group (ILZSG), опубликованным в 2014 г., в настоящее время общие (геологические) (Resources) запасы цинка и свинца в мире довольно значительны (рис. 1). Однако извлекаемые (эксплуатационные) (Reserves) запасы с учетом ежегодной добычи на уровне 13-14 млн т для цинка и 5-6 млн т для свинца [1, 2] уже не кажутся столь большими. Более того, динамика добычи Zn и Pb (рис. 2А, 2Б) при закономерном падении средних содержаний в добываемой руде (рис. 2В) свидетельствуют о далеко не безоблачной ситуации на рынке этих металлов. Причем это относится не только к цинку, производство которого напрямую связано с объемом его добычи, но и к свинцу, несмотря на то, что более половины мирового объема этого металла (54-56 %) приходится на его вторичное производство (переработку).

Руды свинцово-цинковых месторождений являются комплексными и характеризуются сложным минеральным составом. Помимо двух главных металлов – Zn и Pb (при этом в большинстве случаев цинк преобладает над свинцом), в рудах в том или ином количестве содержатся Cu, Ag, Au, Cd, In, Sn, Sb, Bi, Se, Te, которые извлекаются в качестве попутных компонентов. В свинцово-цинковых рудах сосредоточено более 80 % мировых запасов кадмия, 40-50 % таллия, 25-30 % германия, 20-25 % селена, теллура, индия, 15-20 % галлия и висмута. Особо стоит обратить внимание на то, что они служат важнейшим источником серебра – около 32 % его мировой добычи извлекается попутно при переработке Pb-Zn руд (рис. 3).

Среди свинцово-цинковых месторождений выделяются несколько промышленно-генетических типов. Доля каждого из них в общем мировом балансе видна на примере распределения запасов цинка (Resources и Reserves) и его годовой добычи по различным типам месторождений (рис. 4).

На представленных диаграммах хорошо видно, что в настоящее время и особенно в перспективе главным источником цинка (свинца, серебра) являются месторождения типа SEDEX,

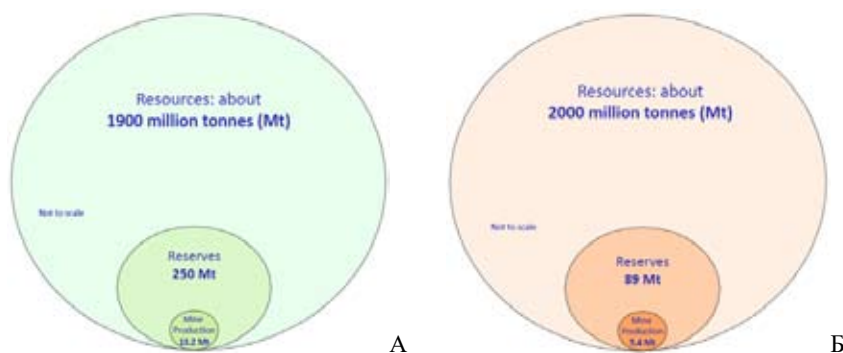


Рис. 1. Соотношение общих (геологических) (Resources), извлекаемых (эксплуатационных) (Reserves) запасов и годовой добычи (Mine Production) цинка (А) и свинца (Б) (по данным USGS, ILZSG, 2014)

Fig. 1. World Zinc (A) and Lead (B) Reserves (date from USGS, ILZSG, 2014)

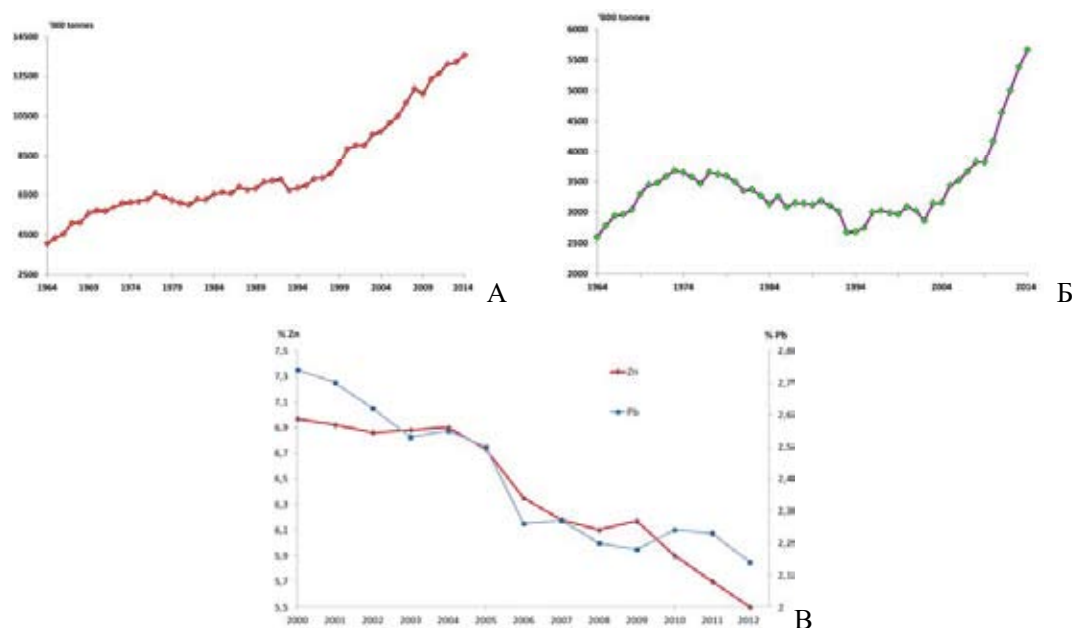


Рис. 2. Мировая добыча за период 1964-2014 гг. цинка (А) и свинца (Б) и средние содержания в добываемых рудах (В) (по данным USGS, ILZSG, Wood Mackenzie, Macquarie Research)

Fig. 2. Total World mine production of Zn (A) and Pb (B) and falling average mine grades during the period of 1964-2014 (B) (date from USGS, ILZSG, Wood Mackenzie, Macquarie Research)

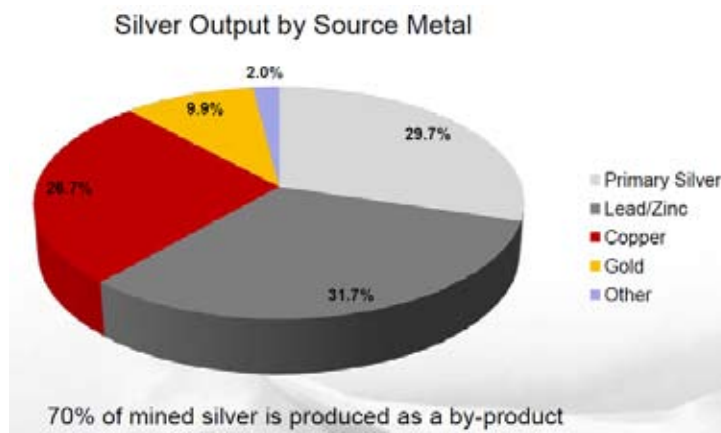


Рис. 3. Источники получения серебра (по данным GFMS & The Silver Institute)

Fig. 3. Silver output by mine's source metal (date from GFMS& The Silver Institute)

при этом их значимость во времени (от сегодняшних добычных карьеров к геологическим запасам, т.е. будущим объектам эксплуатации) постоянно возрастает. Кроме SEDEX в мировом балансе Pb и Zn большое значение имеют месторождения VMS- и MTV-типов. Месторождения этих трех типов (SEDEX, VMS и MTV) содержат около 70-80 % суммарных мировых запасов Pb и Zn.

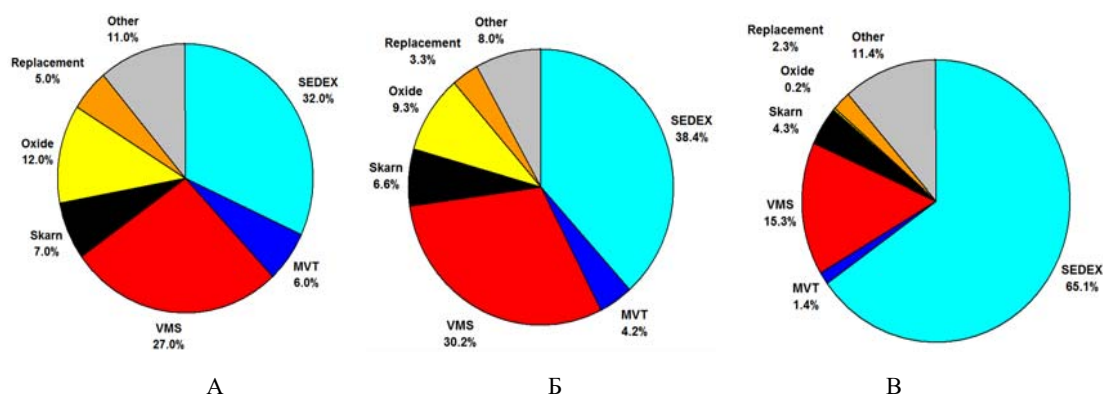


Рис. 4. Распределение годовой добычи (Mine Production) (А), эксплуатационных (Reserves) (Б) и геологических (Resources) (В) запасов цинка в мире по основным типам месторождений [3]

Fig. 4. World Zinc production (A), reserves (Б) and resources (B) according to the main types of deposits [3]

Месторождения аналогичных геолого-промышленных типов выделяются и в отечественной классификации, но они имеют свое название:

- близким аналогом месторождений SEDEX (Sedimentary Exhalative) в отечественной геологической литературе являются стратиформные Pb-Zn месторождения в терригенных и терригенно-карбонатных толщах;
- месторождения VMS (Volcanogenic Massive Sulfide) являются аналогами отечественных колчеданно-полиметаллических месторождений вулканической ассоциации;
- месторождения MVT (Mississippi Valley-type) – это, по отечественной классификации, стратиформные месторождения в карбонатных формациях.

При всех существующих между месторождений этих трех типов различиях их важными общими особенностями считаются стратифицированность, преобладающая пласто- и линзообразная форма рудных тел, сходный геохимический состав руд. Для месторождений SEDEX и VMS это еще, как правило, и небольшая разница во времени между формированием рудовмещающих пород и самих руд.

В Российской Федерации запасы Zn и Pb, учтенные Государственным балансом на 01.01.2015, насчитывали, соответственно, 60,3 и 19,4 млн т [4], или примерно 9 и 6 % мировых¹. Большая часть этих запасов (74,5 % Zn и 65,9 % Pb) содержится в так называемых колчеданных месторождениях: колчеданно-полиметаллический и цинково-медно-колчеданный геолого-промышленный тип.

Здесь необходимо некоторое пояснение: термин «колчеданные месторождения» введен впервые в научную литературу русскими исследователями и в западной литературе он практически не используется. По определению В.И. Смирнова, к колчеданным относятся месторождения, руды которых сложены преимущественно сульфидами железа. Минеральный состав всех колчеданных месторождений вне зависимости от того, представлены они массивной

¹ Некоторое несоответствие запасов, стоящих на Госбалансе РФ, с данными ILZSG объясняется невозможностью прямого соотнесения цифр запасов, утвержденных ГКЗ РФ (СССР), и цифр, подсчитанных в соответствии с принятыми мировым горным сообществом (Австралия, Канада и США, Южная Африка, Чили и др.) критериями кодексов Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO).

или вкрапленной рудой, отличаются резким преобладанием пирита, пирротина, марказита, с которыми ассоциируют халькопирит, сфалерит, галенит, борнит, блеклые руды, реже другие рудные минералы.

В настоящее время семейство колчеданных месторождений по составу рудоносных формаций разделяется на две отчетливые группы [5]. Одна из них тесно ассоциирует с вулканогенными формациями и является, можно сказать, классической колчеданной. Как раз она и представляет собой отечественный аналог VMS месторождений по западной терминологии. Другая группа тесно связана с терригенными и терригенно-карбонатными толщами при незначительном развитии вулканитов и выступает российским аналогом месторождений SEDEX. Новые данные по геологическому строению обеих групп месторождений (SEDEX и VMS) и современным гидротермальным системам, полученные за последние 20-30 лет, показывают их существенные различия. Наиболее важные из них – состав рудовмещающей толщи пород и отсутствие прямой связи с вулканизмом для месторождений типа SEDEX в отличие от месторождений VMS-типа, формирование которых связано с подводной гидротермальной активностью вулканогенной природы. Кроме того, в отличие от колчеданно-полиметаллических месторождений вулканической ассоциации (VMS) стратиформные свинцово-цинковые месторождения в терригенных и терригенно-карбонатных толщах (SEDEX), за редким исключением, не содержат в своем составе промышленных скоплений меди, но зато имеют высокие содержания серебра в рудах. По геодинамическим условиям образования и геологическому строению промежуточным звеном между этими двумя группами (VMS и SEDEX) могут быть колчеданные месторождения типа Besshi [6], которые нередко встречаются в районах развития месторождений SEDEX (например, бассейн Sullivan), но отличаются от них составом руд [7].

По условиям образования и масштабам оруденения близким современным аналогом месторождений типа SEDEX являются отложения металлоносных осадков в депрессии рифтовой зоны на дне Красного моря (впадина Атлантис II) [8]. Размеры впадины достигают 5 x 14 км с максимальной глубиной 2170 м. В ее пределах в условиях бескислородного бассейна металлы осаждаются в виде тонких слоев железистых осадков и сульфидов, образуя слоистые залежи колчеданных руд. Средние содержания Zn в пределах таких залежей 2,8-5,05 %, железа – 23,5-35,5 %; концентрация золота около 1 г/т, серебра – 80 г/т. Общие запасы цинка и серебра во впадине оцениваются, соответственно, около 2,5 млн т и 9 тыс. т.

С учетом вышеизложенного основная часть российских месторождений свинца и цинка так называемого колчеданного промышленно-генетического типа – рудноалтайские (Корбалихинское, Рубцовское), уральские (Гайское, Подольское, Учалинское и др.), Кызыл-Таштыгское в Тыве и др., относятся к колчеданно-полиметаллическим месторождениям вулканической ассоциации (VMS) и в этой статье не рассматриваются. И **только три из стоящих в настоящее время на балансе месторождения в России относятся к стратиформным свинцово-цинковым в терригенных и терригенно-карбонатных толщах (SEDEX), однако именно с ними связана основная часть запасов Zn и Pb, соответственно, 51,8 и 63 %. Это Холоднинское, Горевское и Озерное месторождения.** Все три месторождения находятся в Сибирском регионе и относятся к месторождениям SEDEX-типа. По своему размеру (табл. 1) они входят в группу месторождений «мирового класса» (запасы Zn+Pb более 10 млн т).

Таблица 1. Крупнейшие в мире месторождения SEDEX

Table 1. The world biggest SEDEX deposits (Summary Statistics) (after [3])

Название месторождения	Страна	Cu, %	Zn, %	Pb, %	Zn+Pb, %	Ag, г/т	Au, г/т	Запасы руды, млн т	Запасы Zn+Pb, млн т
<i>Broken Hill</i>	Австралия	0.1	8.5	10.0	18.5	148	0.47	280	51.8
<i>Hilton-George Fisher</i>	Австралия		11.3	5.4	16.7	97		227	37.9
<i>Red Dog</i>	США		16.6	4.6	21.2	83		165	35.0
<i>HYC (McArthur River)</i>	Австралия	0.2	9.3	4.1	13.4	92	0.005	227	30.4
<i>Howards Pass (total)</i>	Канада		4.9	1.6	6.5			389	25.3
<i>Холоднинское</i>	Россия		4.1	0.7	4.7	28		519	24.6
<i>Mount Isa</i>	Австралия		7.0	6.0	13.0	150		150	19.5
<i>Sullivan</i>	Канада		5.9	6.1	11.9	67		162	19.3
<i>Rampura-Agucha</i>	Индия		13.9	2.0	15.9	45		107	17.1
<i>Century</i>	Австралия		13.1	1.8	14.9	46		95	14.1
<i>Changba-Lijagou</i>	Китай		7.0	1.3	8.3			143	11.8
<i>Gamsberg</i>	ЮАР		7.1	0.6	7.7			153	11.7
<i>Горевское</i>	Россия		1.6	6.4	8.0	51		126	10.1
<i>Озерное</i>	Россия		6.6	1.3	7.8	38		128	10.0
<i>Dongshengmiao</i>	Китай		3.1	0.8	3.9			238	9.3

Краткий мировой обзор месторождений SEDEX

В мире на сегодня известно 132 месторождения типа SEDEX [3]. Они распространены довольно неравномерно (рис. 5), и по количеству сосредоточенных в них запасов выделяются несколько основных районов их развития.

В первую очередь это «Цинковый пояс Австралии» и район крупнейшего в мире по запасам цинка и свинца месторождения – Broken Hill. Здесь находятся 6 из 10 самых крупных Pb-Zn – месторождений этого типа: Broken Hill (51,8 млн т Zn+Pb) (рис. 6A-B), McArthur River (30,4),



Рис. 5. Расположение основных месторождений SEDEX

Fig. 5. World map showing locations of main SEDEX deposits



А



Б



В



Г

Рис. 6. Месторождения Австралии. Месторождение Broken Hill. Отрабатывается с 1883 г.: А – главная рудная залежь. Карьеры Blackwood (на переднем плане), Kintore (на заднем плане). Здесь же три участка подземной добычи (Browne&Marsh Shafts, Delprats Shaft and Shaft № 7). Общий размер участков по поверхности 0,5х3,8 км, глубина отработки до 700 м. Добыто более 54 млн т руды со средним содержанием Zn 6,5 %, Pb 12,5 %, Ag 280 г/т. До сих пор активно отрабатывается; Б – карьер Kintore (отработанный); В – обратите внимание – добычной участок находится прямо в центре одноименного городка; Г – месторождение Century. Бассейн Mount Isa. “Цинковый пояс Австралии»

Fig. 6. SEDEX deposits of Australia. Broken Hill deposit. Has been mining since 1883. А – the main ore body. Open-pits Blackwood (in the foreground), Kintore (in the background). Here are three sites of underground mining (Browne&Marsh Shafts, Delprats Shaft and Shaft № 7). Their common size on the surface is 0,5х3,8 km, the depth of mining is up to 700 m. It has been mined more than 54 Mt with the average grade of Zn 6,5 %, Pb 12,5 %, Ag 280 g/t. It is still being actively mined; Б – open-pit Kintore (mined); В – note: the mining site is just in the center of the town with the same name; Г – century deposit. Mount Isa area. “Zinc belt of Australia”

Mount Isa (19,5), Hilton (20,3), George Fisher (17,6) и Century (14,1) (рис. 6Г). На фоне этих гигантов другие месторождения этого района – Dugald River (6,8), Cannington (7,0), Lady Loretta (3,1) и др. – выглядят заурядными объектами. Суммарные запасы десяти самых больших SEDEX месторождений Австралии содержат 173 млн т Zn+Pb.

В Северной Америке находится второй по значимости район развития месторождений SEDEX. Это месторождения Канадских Кордильер (в сумме 67 млн т Zn+Pb) – Sullivan, Howards Pass, Jason, Tom, South Cirque и др. (рис. 7А). Несколько месторождений есть на Аляске (суммарные запасы 41,9), в первую очередь это крупнейший в мире цинковый рудник Red Dog (рис. 7Б), которой отрабатывает одноименное месторождение с самым высоким в мире средним содержанием в руде среди месторождений этого типа – Zn+Pb – 21,2 %.



А



Б

Рис. 7. Месторождения Северной Америки: А – месторождение Scotia. Район Howard Pass. Канада, Восточный Юкон; Б – месторождение Red Dog. США, Аляска

Fig. 7. SEDEX deposits of North America. А – scotia deposit. Howard Pass region. Canada, East Yukon; Б – red Dog deposit. USA, Alaska

Таблица 2. Некоторые геолого-экономические параметры месторождений SEDEX [3]

Table 2. Metals grades and tonnage for global SEDEX deposits [3]

n=132	Содержание в руде				Запасы руды, млн т	Запасы Pb+Zn, млн т
	Cu, %	Zn, %	Pb, %	Ag, г/т		
Среднее	0,97	6,76	3,28	63	34,78	3,16
Минимальное	0,04	0,11	0,22	3	0,0002	0,006
Максимальное	4,6	20	35,5	673	519	58,8

Крупные по запасам кластеры месторождений SEDEX находятся в Индии (пояс Rampura-Agucha, 24,7), Южной Африке (район Aggeneys, 22,1), Китае (пояс Синьлинь и Внутренняя Монголия), Rammelsberg (6,6) в Германии. На территории СНГ, кроме России, месторождения типа SEDEX известны в Казахстане (Текели (5,5), Жайрем (1,4) и др.), Азербайджане (Филизчайское (6,5)).

Размеры месторождений SEDEX и уровень содержаний полезных компонентов варьируют в довольно широких пределах (табл. 2).

Сравнение среднестатистических представителей разных типов месторождений цветных металлов показывает, что усредненное месторождение SEDEX по количеству запасов руды на порядок превышает усредненное колчеданно-вулканогенное (VMS) месторождение. Оно уступает по этому показателю лишь медно-порфировым месторождениям, однако по количеству полезных компонентов в руде (за счет значительно более высоких содержаний) превосходит и его. Из 132 месторождений типа SEDEX 50 имеют запасы более 20 млн т. По запасам полезных компонентов (металлов) именно среди месторождений этого типа наиболее часто встречаются гигантские (более 10 млн т) и супер-гигантские (более 30 млн т) месторождения [3].

Несколько примеров, демонстрирующих масштабность месторождений SEDEX. Первое из известных месторождений такого типа – Rammelsberg (Германия, Земля Нижняя Саксония) – отрабатывали более 1000 лет (с 1968 по 1988 г.), причем главным объектом добычи в начальный период было серебро. Последняя порция руды этого месторождения была выдана на-гора 30

июня 1988 г., а всего за все время эксплуатации было добыто 27 млн т. руды, содержащей около 5,1 млн т Zn, 2,4 млн т Pb и 4300 т Ag. Другой пример, с 1883 г. по настоящее время ведется отработка супергигантского австралийского месторождения Broken Hill, и к настоящему времени на нем добыто более 54 млн т руды со средним содержанием 6,5 % Zn, 12,5 % Pb и 280 г/т Ag. На Североамериканском континенте в Британской Колумбии в 1892 году было открыто месторождение Sullivan, которое непрерывно с успехом обрабатывается с конца XIX в. и по сей день подземным способом.

Однако несмотря на то, что месторождения SEDEX уже более 100 лет являются одним из ведущих объектом поисков геологов Австралии, Северной Америки и др., до сих пор даже в уже хорошо изученных горно-рудных районах открываются новые крупные объекты. Так, компанией Rox Resources в Северной Австралии в пределах «Цинкового пояса» (McArthur Basin) в 2010 г. с помощью бурения было выявлено месторождение Myrtle. Уже в 2011 г. его запасы составляли Zn+Pb 2,2 млн т, а по оценкам геологов компании потенциал этого нового месторождения превышает 10 млн т одних только полиметаллов.

В России месторождения этого типа стали активно изучаться лишь после открытия Горевского (1956), Холоднинского (1968) и Озерного (1963) месторождений. Из них в настоящее время обрабатывается одно Горевское месторождение (ОАО «Горевский ГОК» и ООО «Новоангарский ГОК»). Озерное месторождение готовится к отработке компанией ООО «Корпорация «Металлы Восточной Сибири». Разработка самого крупного из них Холоднинского месторождения (35,1 Zn и 17,3 % Pb в общих балансовых запасах РФ) вряд ли реальна в обозримом будущем в связи с тем, что оно находится в охранный зоне оз. Байкал. Таким образом, числящиеся в настоящее время на общероссийском балансе запасы Zn и Pb, с учетом реальной возможности их вовлечения в эксплуатацию, на фоне растущей мировой потребности в этих металлах, вряд ли могут обеспечить в ближайшем будущем потребности нашей экономики. *Необходимы поиски новых серебро-свинцово-цинковых месторождений, при этом, ориентируясь на мировой опыт, следует обратить внимание на поиски именно месторождений SEDEX-типа как наиболее экономически привлекательного. Тем более, что все предпосылки для выявления новых месторождений такого типа у нас есть.*

Общая геологическая характеристика месторождений типа SEDEX

Геологические черты месторождений SEDEX или «стратиформных Ag-Pb-Zn-месторождений в терригенных и терригенно-карбонатных толщах» (по отечественной терминологии), исследуются уже более 100 лет. За это время довольно хорошо выявлены особенности геологического строения месторождений этого типа, закономерности их размещения в пространстве и времени. Все это успешно используются при проведении поисково-разведочных и эксплуатационных работ во всем мире. Более того, именно широкое использование генетических моделей типоморфных месторождений при прогнозировании, поисках и разведке лежит в основе больших успехов западных компаний в открытии в последние десятилетия многих месторождений, в том числе крупных стратиформных серебро-свинцово-цинковых (Hilton, George Fisher, Myrtle и др.) и медно-порфириновых (Oyu Tolgoi, Reco Dig, Cadia и др.).

Как уже было сказано, описанию геологических особенностей месторождений типа SEDEX посвящены многочисленные статьи и монографии различных исследователей, при этом мож-

но выделить [3, 9-11], в которых, по мнению авторов этой статьи, они приведены в наиболее полном и систематизированном виде. В связи с этим мы не будем детально описывать геологические черты месторождений SEDEX, однако для понимания общей концепции в направлении поисков необходимо вкратце остановиться на главных из них.

Месторождения этого типа связаны с углеродистыми терригенными и терригенно-карбонатными формациями флишоидного типа, в состав которых иногда входят вулканогенные комплексы базальтового или риолито-базальтового ряда. Рудоносные формации накапливаются в палеотектонической обстановке в условиях растяжения – в пределах рифтов на коре континентального типа формируются бассейны, в которых аккумулируются терригенно-осадочные отложения большой мощности – 2-5 км. Рудоносные толщи перекрываются пострифтовыми глинистыми сланцами и карбонатами. Палеогеодинамическая обстановка формирования таких рифтогенных структур представлена тремя типами:

- в виде задугового бассейна («Цинковый пояс» в Северной Австралии);
- внутри континентальный рифт (бассейн Sullivan в Канаде);
- в пределах пассивной континентальной окраины (Северная Аляска, обрамление Сибирской платформы) [10].

По особенностям состава руд и приуроченностью к рудовмещающим толщам различного формационного и литолого-фациального состава выделяются несколько подтипов месторождений SEDEX. Например, филизчайский, раммельсбергский, атасуйский, салливанский и др. – отечественный вариант [5], или Broken Hill Type (BHT) и Irish-Type – западный [3]. В целом, они образуют единый латеральный ряд месторождений, в котором изменчивости рудоносных формаций (от углеродисто-кремнистых бескарбонатных, содержащих вулканы, до углеродистых карбонатных и карбонатных рифогенных) соответствует закономерно меняющийся состав руд. Последний выражается соотношением основных рудообразующих металлов – цинка и свинца, а также меди, серебра и бария. Например, рудовмещающие формации Холоднинского и Горевского месторождений по соотношению терригенных, кремнистых и карбонатных пород относятся к разным подтипам и, соответственно, имеют отличающийся состав руд:

- углеродистая кремнисто-карбонатно-терригенная с халькопирит-галенит-сфалеритовой минерализацией, $Pb:Zn = 1:3 \div 1:13$ (среднее 1:5) (Холоднинское);
- углеродсодержащая кремнисто-глинисто-доломит-сидеритовая с сидерит-сфалерит-галенитовой минерализацией, $Pb:Zn = 4:1$ (Горевское) [5].

Как правило, возрастание роли свинца коррелирует с повышением в разрезе доли карбонатной составляющей над терригенной.

Общим для всех месторождений SEDEX является формирование в застойных обстановках осадконакопления окраинных и внутриконтинентальных морей. Рудоконтролирующими структурами служат локальные палеодепрессии высоких порядков. Формирующая месторождения SEDEX гидротермальная система долгоживущая и фокусирующая, т.е. контролируется разломами, причем довольно часто рифтообразующими. Рудоотложение происходит в бескислородных бассейнах с высоким содержанием сероводорода. Большинство вмещающих пород обогащено углеродом. Основная масса рудной минерализации стратифицирована, поэтому можно повсеместно наблюдать тонкослоистые горизонты, па-

раллельные напластованию, а также переслаивание рудных прослоев с терригенным и карбонатным материалом и сульфидами железа (рис. 8А-Г). Локально развиты штокверковые и брекчиевые руды, которые обычно маркируют участки рудоподводящих каналов (Feeder zone).

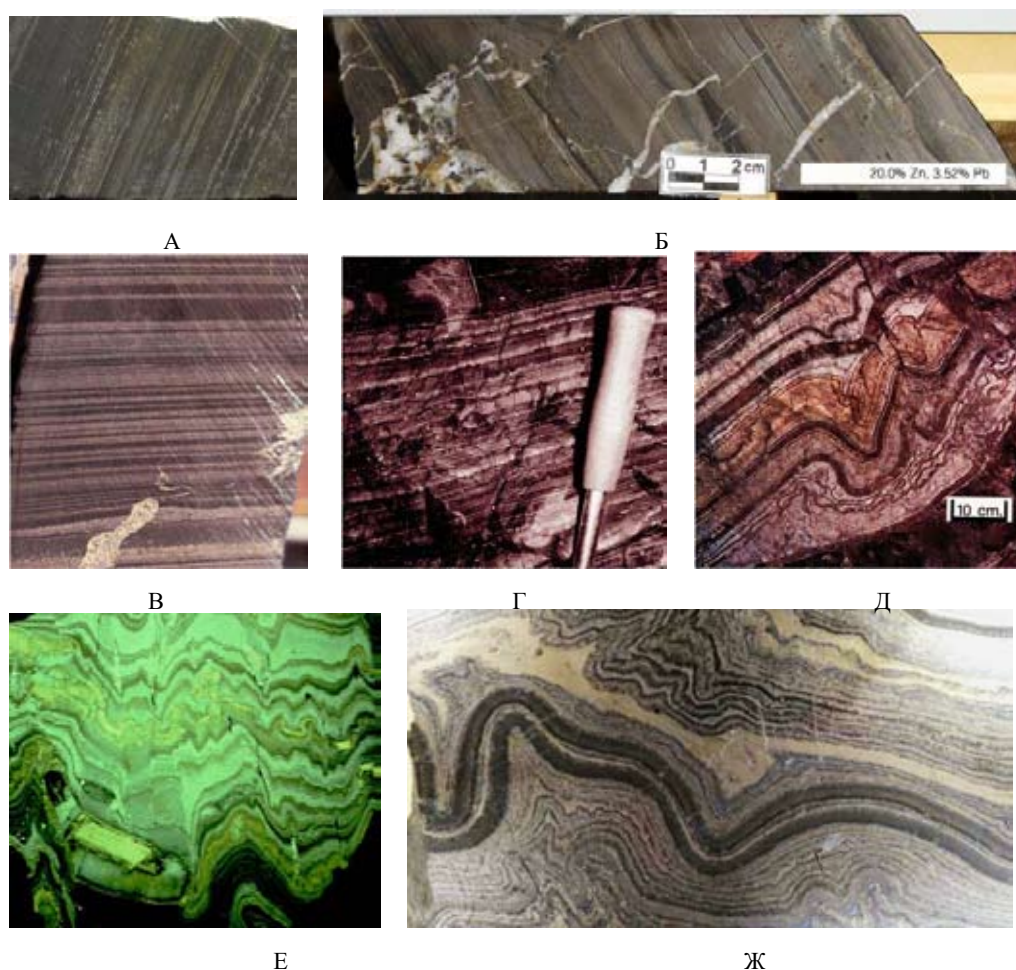


Рис. 8. Типичные руды месторождений SEDEX: А – полосчатые сфалерит-пиритовые руды. Месторождение Myrtle, группа McArthur River; Б – богатые Ag-Pb-Zn руды. Месторождение Myrtle, группа McArthur River; В – тонкие прослои сульфидов (сфалерит, галенит, пирит) в известковых и углеродистых сланцах. Месторождение Century, Австралия, группа Mount Isa; Г – прослои сульфидов в кремнистом аргиллите. Месторождение Rammelsberg, Германия; Д – смятые в складки прослои сфалерита, галенита и пирита в аргиллите. Месторождение Sullivan, Канада; Е – смятые в складки прослои сфалерита, галенита и пирита в кремнистом известняке. Месторождение Howards Pass, Канада; Ж – богатая Ag-Pb-Zn руда. Месторождение Sullivan, Канада

Fig. 8. Typical ores of SEDEX deposits. А – layering of sphalerite-pyrite ores. Myrtle deposit, the McArthur River group; Б – High-grade of Ag-Pb-Zn ores. Myrtle deposit, McArthur River group; В – Thin layers of sulphids (sphalerite, galena, pyrite) in the calcareous and carbonaceous shales. Century deposit, Australia, Mount Isa group; Г – Interlayers sulfides in siliceous claystone. Rammelsberg deposit, Germany; Д – Folded layers of sphalerite, galena and pyrite in the argillite. Sullivan deposit, Canada; Е – Folded layers of sphalerite, galena and pyrite in the silica limestone. Howards Pass deposit, Canada; Ж – High-grade Ag-Pb-Zn ore. Sullivan deposit, Canada

Рудные тела, как правило, локализованы среди обогащенных углеродом терригенных (углеродистые черносланцевые комплексы) или терригенно-карбонатных пород с прослоями хемогенных осадков (кремни, карбонаты, барит) (рис. 9).

Рудовмещающие горизонты по сравнению с безрудными характеризуются более резкой сменой литофаций и относительно повышенными (на 1-2 %) содержаниями углерода. Обычно они приурочены к средним частям формаций [5]. Как правило, широко развита послойная вкрапленность, желваки, иногда прослойки, пирита или пирротина. Морфология рудных залежей пластообразная, линзовидная, блюдцеобразная, реже куполовидная и клиновидная. Мощность рудных тел от первых до десятков метров, длинн по простиранию сотни метров, редко – первые километры. Рудная минерализация имеет простой минеральный состав. Главные рудные минералы на большинстве месторождений: пирит, пирротин, галенит, сфалерит. Второстепенные – халькопирит, арсенопирит, блеклые руды, марказит, магнетит. Ореолы гидротермально измененных пород могут быть обширными (px100 м по вертикали и px1 км по простиранию), но они, как правило, слабо выраженные и поэтому сложно диагностируемые и картируемые.

Многие месторождения описываемого типа вместе с вмещающими их породами, испытали складчатые деформации и региональный метаморфизм от зеленосланцевой (Mount Isa) до амфиболитовой и даже гранулитовой фаций (Broken Hill). Руды этих месторождений перекристаллизованы (что значительно улучшило их обогатимость за счет укрупнения минеральных зерен), сами рудные тела часто смяты в складки (рис. 8Д-Ж), при этом в результате регенерации наблюдается частичная перегруппировка рудного вещества в виде секущих жил и прожилков с рудной минерализацией (рис. 8Б).



А

Б

Рис. 9. Месторождение Kangerluarsuk. Восточное побережье Гренландии. В 20 км севернее месторождения Black Angel (13 млн т руды с содержанием Zn+Pb 16 %; отрабатывалось с 1971 по 1990 г.). А – рудовмещающая пачка метатерригенных пород с горизонтами кремнисто-углистых алевролитов с вкрапленностью пирротина; Б – полосчатые Ag-Pb-Zn руды месторождения Kangerluarsuk

Fig. 9. Kangerluarsuk deposit. The northern coast of Greenland. 20 km to the north from the Black Angel deposit (13 Mt of ore with 16 % Zn+Pb, was mining from 1971 till 1990). A – The ore-bearing group of metatrigenic rocks with horizons of siliceous-carbonaceous siltstones with impregnation of pyrrhotite; Б – Banded Ag-Pb-Zn ores of Kangerluarsuk deposit

Особо необходимо обратить внимание на возраст месторождений типа SEDEX. На протяжении всей истории Земли месторождения этого типа формировались дискретно, в течение нескольких относительно коротких возрастных периодов. Это связано со специфическими условиями их формирования (геодинамическими, седиментационными, физико-химическими и др.). Например, одним из таких условий была анаэробная обстановка (низкое содержание кислорода в воде) и высокая концентрация сероводорода. Крупнейший максимум образования месторождений SEDEX (41 % месторождений и 47 % запасов руды) приходится на период ранний протерозой – начало среднего протерозоя (1900-1500 млн лет) [7]. В течение другого периода, в позднем протерозое-рифее (неопротерозой), сформировались месторождения в обрамлении Сибирской платформы, в том числе Холоднинское (815-755 млн лет) [12] и Горевское (740+/-10 млн лет) [13].

Перспективы России на выявление месторождений типа SEDEX

С учетом всего вышеизложенного на территории России наибольшие перспективы для выявления стратиформных Ag-Pb-Zn-месторождений связаны со складчатым обрамлением Сибирской платформы.

За пределами этого обрамления известно только одно месторождение – Павловское. Оно было выявленное в 1991 г. на Новой Земле и на сегодняшний день содержит лишь 3,3 % от общих балансовых запасов цинка РФ. И хотя в дальнейшем в этом труднодоступном районе обнаружено еще несколько схожих проявлений, Павловское остается пока единственным промышленным объектом на Новой Земле. Следует отметить, что среднепалеозойский возраст пород с Ag-Pb-Zn-минерализацией в этом районе отвечает времени формирования крупнейших североамериканских месторождений, таких как Red Dog на Аляске и бассейна Howards Pass в Канаде. Данное обстоятельство, учитывая дискретность формирования месторождений этого типа во времени, косвенно свидетельствует о хорошем потенциале этой относительно новой северной российской полиметаллической провинции. Однако в данной статье она, как и находящееся в активной фазе освоения месторождение Озерное в Забайкалье, не рассматриваются.

Очевидно, что положение всех крупных Ag-Pb-Zn-месторождений описываемого типа по периферии Сибирской платформы далеко не случайно. Идея о «едином Сибирском периплатформенном полиметаллическом поясе» высказывалась и ранее [14, 15]. В настоящее время в обрамлении Сибирской платформы известно пять районов, перспективных на выявление стратиформного Ag-Pb-Zn-оруденения, причем три из них находятся в Красноярском крае (рис. 10).

При оценке перспектив каждого из этих районов учитывались не только геологические и экономические, но и экологические критерии. Это связано с тем, что в последнее время в мире экологический аспект при оценке жизнеспособности тех или иных проектов все больше и больше выходит на первый план. Например, такие крупнейшие месторождения, как Donlin Creek (Proven&Probable 1053 т + Measured&Indicated 1213 т Au) и Pebble (2100 т Au и 25 млн т Cu) на Аляске, были полностью подготовлены для добычи, но все дальнейшие работы были заморожены по требованию общественности, обеспокоенной возможными экологическими проблемами в случае их разработки.

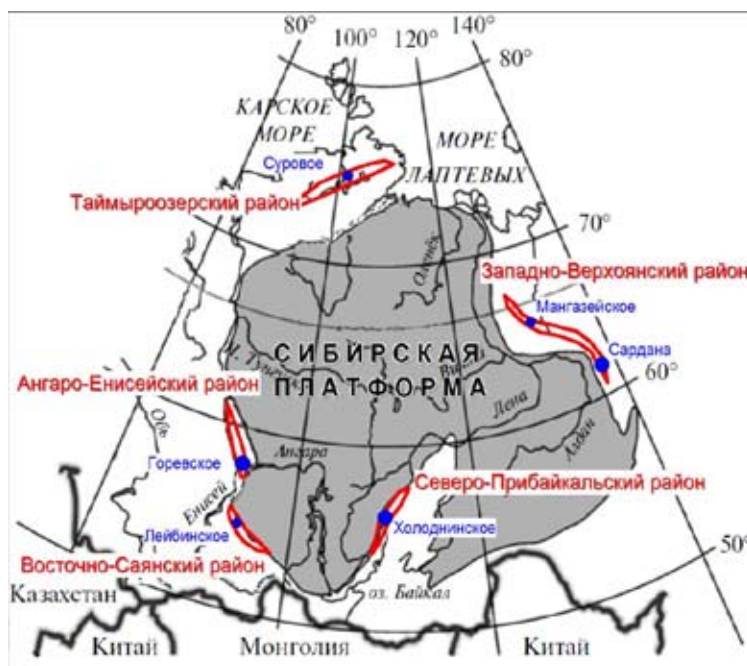


Рис. 10. Схема расположения районов развития стратиформного Ag-Pb-Zn оруденения в обрамлении Сибирской платформы

Fig. 10. The scheme of location of areas with stratabound sediment-hosted Ag-Pb-Zn-deposits in setting of Siberian Craton

Ниже дается характеристика каждого из пяти вышеупомянутых районов, при этом основное внимание уделяется наименее изученным из них.

В первую очередь, это **Северо-Прибайкальский район**, в пределах которого находится самое крупное Ag-Pb-Zn-месторождение России и всей Евразии – Холоднинское. В пределах Олоkitского прогиба, где локализовано это крупнейшее месторождение, найдено еще несколько мелких месторождений и рудопроявлений того же или близкого к нему генезиса – Овгол, Йоко, Рыбачье, Горелое и др. [14]. Но, как уже было сказано, при всей экономической привлекательности этого рудного района его освоение сдерживается экологическими причинами – Холоднинское месторождение находится в 50 км от оз. Байкал и дренирующие его водотоки впадают непосредственно в это уникальное озеро. Таким образом, его промышленное освоение вряд ли будет возможным в обозримом будущем.

Западно-Верхоянский район расположен в северо-восточном обрамлении Сибирской платформы. Он включает выявленное в 1960 г. стратиформное Pb-Zn в карбонатных породах венд-кембрия месторождение Сардана и несколько близлежащих однотипных с ним проявлений (Уруй, Перевальное и др). Запасы месторождения Сардана категории C₂ составляют 1,9 млн т Zn, 0,6 млн т Pb и 672 т Ag с содержаниями, соответственно, 10,5, 3,23 % и 37 г/т. Сейчас оно подготавливается к эксплуатации (ООО «Сибирские цветные металлы»). Кроме того, последние 10-20 лет в этом районе активно разведываются Мангазейское, Кысылтасское, Прогноз и другие месторождения серебро-сурьмяной формации (канадская компания Silver Bear Resources). Они также сформированы на пассивной окраине Сибирской платформы, но

имеют существенно более молодой возраст (граница карбона и перми, 270-315 млн лет назад) и, возможно, являются продуктами регенерации более древнего оруденения [16, 17]. При всех своих геологических плюсах в виде относительно высоких содержаний полезных компонентов месторождения этого района находятся в отдаленной, экономически не освоенной части Северо-Восточной Якутии, что предъявляет к ним повышенные геолого-экономические требования.

Ангаро-Енисейский рудный район является наиболее известным из трех районов стратиформных Ag-Pb-Zn-месторождений, расположенных на территории Красноярского края. Он включает единственное успешно разрабатываемое в настоящее время Горевское месторождение, которое обеспечивает львиную долю российской добычи свинца (около 70-80 %). Горно-технические условия эксплуатации месторождения довольно сложные, что связано с залеганием части руд непосредственно под руслом р. Ангары. Это отразилось на схеме его отработки – открытый способ до глубины 300 м под защитой дамбы от вод р. Ангары и подземный – шахтный – для разработки глубоких горизонтов месторождения.

Доизучение и освоение других месторождений (Линейное) и проявлений (Лимонитовое, Морянихинское, Верхнее-Каменское, Большепитское, Анатольевское, Сухопитское и др.), помимо всего прочего, сдерживается отдаленностью и недостаточной энергообеспеченностью территории Северо-Енисейского, Мотыгинского и правобережной части Енисейского районов, где основное внимание традиционно уделяется месторождениям золота крупнейшей Енисейской золоторудной провинции.

Таймыроозерский район выделяется на севере края [18-20]. В его пределах установлены два месторождения и многочисленные проявления полиметаллов. По возрасту вмещающих отложений их можно разделить на две группы: докембрийские и позднепалеозойско-мезозойские [19, 20].

Наиболее известный представитель перовой группы – рудопоявление района оз. Трёх Сестёр, где участки с Ag-Pb-Zn-оруденением локализованы в вулканогенно-карбонатно-терригенных отложениях рифея. Сульфидная минерализация наблюдается во всех типах пород в виде редкой вкрапленности и прожилков пирита (1-5 %), при этом максимальные концентрации находятся в углеродистых сланцах. Рудоносная структура северо-восточного простирания прослежена на 12 км, при этом отдельные рудные зоны имеют длину до 1000 м при ширине до 50 м. Рудная сфалерит-галенитовая минерализация по условиям локализации подразделяется на два типа. Первый, основной, продуктивный тип имеет вкрапленный характер и образует линзовидные пластообразные тела. В составе руд преобладает галенит, меньше развиты сфалерит и пирит, реже присутствуют халькопирит, бурнонит и герсдорфит. Среднее содержание свинца 5 % при вариациях 2-10 %, цинка 0,5-2 %. Содержание золота составляет 0,01-0,35 г/т, серебра – более 100 г/т. На поверхности на восточном берегу оз. Трёх Сестёр в обломках размером 5 x 10 см встречены сливные руды, содержащие 22 % свинца, 1-2 % цинка, до 100 г/т серебра и до 0,7 г/т золота. Второй тип минерализации не образует богатых рудных скоплений и представлен тонковкрапленными и прожилково-вкрапленными рудами в участках дробления и окварцевания на контактах различных пород и в пачках чёрных углеродистых сланцев. Суммарные содержания свинца и цинка составляют 1-12 %, при этом иногда сфалерит преобладает над галенитом; содержание золота – 0,2-1,3 г/т, серебра – 1,2-43,9 г/т.

Серебро полиметаллическое оруденение позднепалеозойско-мезозойской группы представлено двумя месторождениями (Партизанское и Суровое) и несколькими проявлениями (Гора Геологов, Оранжевое и др.) в терригенных породах пермо триасового возраста хр. Быр-ранга. Общая протяженность пояса развития полиметаллического оруденения этой группы составляет 400 км при ширине 20-40 км. В пределах пояса выделяются Западно-Таймырский и Суровоозерский рудные районы, в которых выявлены и частично разведаны соответственно Партизанское и Суровое месторождения. На обоих месторождениях оруденение представлено крутопадающими рудными жилами и брекчиевыми зонами галенит-сфалерит-сидеритового состава. Мощность рудных тел достигает в раздувах 3-4 м, а по простиранию наиболее крупные из них прослежены на расстоянии до 2 км. Содержания главных полезных компонентов (Pb и Zn) варьируют в широких пределах, в зависимости от типа руд – от вкрапленных до массивных. Подсчитанные запасы свинца и цинка на Партизанском месторождении составляют 60,4 и 60,6 тыс. т соответственно (при среднем содержании свинца 19,77 %, цинка 19,82 %, средней мощности рудного тела 1,1 м). На месторождении Суровом подсчитаны запасы свинца – 18 тыс. т, цинка – 10 тыс. т. Необходимо отметить, что в рудах обоих месторождений установлено высокое содержание серебра (до 500-2000 г/т) и кадмия (до 1 %) [19, 20].

Перспективы Таймыроозерского района на выявление Ag-Pb-Zn-месторождений выглядят весьма привлекательно и оцениваются многими исследователями положительно, однако крайняя труднодоступность и полное отсутствие инфраструктуры очень осложняют их реализацию.

Все охарактеризованные выше районы в разной степени изучены и постоянно находятся в поле зрения заинтересованных организаций. Оценка их перспектив проводилась неоднократно в разное время и различными исследователями. Сложности, связанные с их освоением (труднодоступность, экологические ограничения, горно-технические проблемы и др.), тоже хорошо известны. Вместе с тем на юге Красноярского края находится район, который по своим геологическим характеристикам соответствует всем вышеприведенным критериям перспективности территории на выявление месторождения типа SEDEX. Речь идет о Восточном Саяне, точнее о его северо-западной части, которая приходится на бассейны р. Мана, Дербина и Сисим. В геологическом плане эта территория отвечает двум крупным сопряженным геологическим структурам в юго-западном обрамлении Сибирской платформы. Дербинскому антиклинорию и Манскому прогибу. Именно в пределах этих двух геологических структур находится **Восточно-Саянский рудный район** (рис. 11).

Перспективы Восточно-Саянского района на выявление месторождений типа SEDEX

Перспективы **Восточно-Саянского района** на выявление Ag-Pb-Zn месторождений многими геологами, изучавшими его (В.И. Яшук, Г.В. Филиппов, В.С. Кузечный, Б.П. Чесноков, В.В. Некос и др.), всегда оценивались положительно. И хотя в этом районе пока не обнаружено ни одного промышленного месторождения, однако здесь сеotcndetn ряд интересных, перспективных проявлений с высоким содержанием как полиметаллов (Pb+Zn), так и серебра (рис. 12).



Рис. 11. Упрощенная тектоническая схема территории сочленения юго-западной части Сибирской платформы и Центрально-Азиатского пояса (на основе [21]). Желтым показан контур Восточно-Саянского рудного района. Синие кружки – проявления Ag-Pb-Zn-оруденения

Fig. 11. Symplified tectonic scheme of the contact area of the south-west part of Syberian Craton with the Central-Asian belt (according to [21]). The outline of the East Sayan ore region is in yellow. Blue circles are the areas with Ag-Pb-Zn-occurence

Основная их часть находится в пределах Лейбинского рудного узла. Наиболее изучено среди них Лейбинское проявление, в пределах которого разведано четыре участка, образующих единую протяженную зону 3500×150-600 м. Оруденение представлено массивными и прожилково-вкрапленными рудами. Массивные руды слагают небольшие, сложной конфигурации тела протяженностью 7-25 м и мощностью несколько метров, которые находятся в ореоле вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд. Содержания полезных компонентов весьма неравномерны и колеблются в широких пределах (%): Pb – 0,14-15,03 (среднее 5,83), Zn – 3,29-15,62 (среднее 7,71). Другие проявления в пределах рудного узла (Лагерное, Черемшанное, Орешное и др.) изучены значительно слабее [21]. Все они локализованы в доломитах и известняках кембрийского возраста, слагающих Манский прогиб. Их геологические особенности свидетельствует о наиболее вероятной принадлежности к MVT-типу месторождений (стратиформные в карбонатных формациях).

Другая группа проявлений (Захаржельское, Солонечное, Федоровское, Верхне-Арзыбейское, Миллионная Яма и др.) представлена серебро-свинцово-цинковым оруденением в древних докембрийских толщах. Именно она, по нашему мнению, имеет наибольший практический интерес в этом районе.

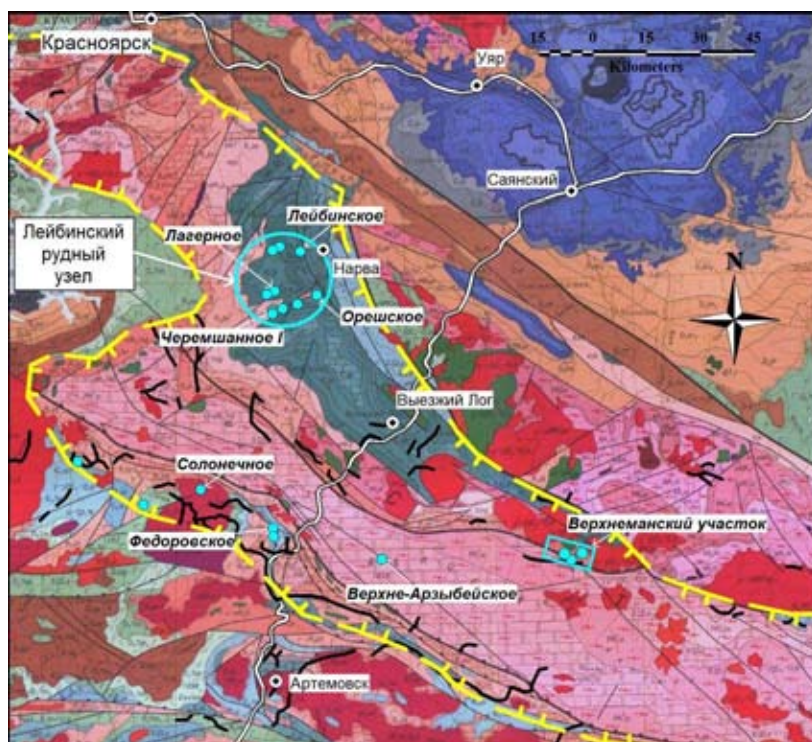


Рис. 12. Фрагмент геологической карты масштаба 1:1 000 000 листа N-46 (на основе [21]). Желтым показан контур Восточно-Саянского рудного района. Синие кружки – проявления Ag-Pb-Zn-оруденения. Черным – россыпи золота

Fig. 12. A fragment of geological map 1:1 000 000, sheet N-46 (according to [21]). The outline of the North-Sayan ore region is in yellow. Blue circles are areas with Ag-Pb-Zn-occurrence. Gold placers are in black

Первые сведения о находках свинцово-цинковой минерализации в Восточном Саяне в поле развития черносланцевых отложений верхне протерозойского возраста относятся к 1936 г., когда М.А. Волонцевич при поисках золота на водоразделе Большой Синачаги и руч. Станового была открыта кварцевая жила Свинцовая с галенитовой минерализацией. В 1969 г. при заверке литохимических аномалий свинца А.А. Менякиным были установлены рудопроявления полиметаллов с золотом – Захаржельское и Миллионная Яма. Оба приуроченны к черносланцевой толще верхнего протерозоя и находятся друг от друга на расстоянии 3 км. В середине 1960-х гг. В.И. Ящук при изучении Синачагского рудопроявления золота обнаружены еще три точки с полиметаллическим оруденением. В 2000 г. при заверке свинцовой аномалии на водоразделе Большой и Средней Синачаг опять в черных сланцах найдено рудопроявление золота Водораздельное, а в его пределах – кварцевые жилы Сфалеритовая и Дедовская с полиметаллической минерализацией. Основное внимание на этих проявлениях привлекало серебряное оруденение, которое изучалось попутно при проведении поисковых работ на золото. Выявленные жильные тела серебро полиметаллических руд имели мощность от 1 до 3-5 м (в раздувах до 7-12 м) со средним содержанием серебра по отдельным участкам от 87,3 до 138 г/т. В дальнейшем при анализе геологической ситуации был сделан вывод (Некос В.В., 2007), что все находки серебро полиметаллических руд приурочены к единому горизонту, который прослеживается по

простирацию на 6 км. Он хорошо трассируется цепочкой вторичных геохимических ореолов серебра и сложен частым переслаиванием углеродистых сульфидизированных черных сланцев и темно-серых известняков. Мощность отдельных прослоев от первых десятков сантиметров до первых метров, реже первых десятков метров. В черных сланцах отмечаются жилы и прожилки кварцевого и кварц-карбонатного состава, реже – тонкая вкрапленность галенита.

Все ранее известные и новые, 2000-х гг., проявления серебряной и полиметаллической минерализации (Странное, Студенческое и др.) были объединены в Верхнеманскую рудную зону площадью около 150 км² (Верхнеманский участок на рис. 12). В 2010-2012 гг. в ее пределах ОАО «Красноярскгеология» были проведены поисковые работы, которые позволили более детально исследовать новый для этого района тип Ag-Pb-Zn с Au оруденения. Выяснилось, что оно связано с телами пластообразной формы мощностью до 26 м (участки Миллионная Яма, Захаржельский, Синачагский, Станный и Становое). Все они, а также геохимические аномалии Ag, Pb, Zn и Cu находятся исключительно в поле развития терригенно-карбонатных пород верхнего протерозоя: кварц-глинистые и кварц-углеродистые сланцы, переслаивающиеся с мраморизованными известняками (рис. 13, 14).

Кроме того, часть серебро-полиметаллической минерализации связана с телами жильного типа. Средняя мощность жил 3 м, среднее содержание серебра 83,7 г/т, золота – 1,51 г/т. Главный ценный компонент проявлений – серебро, содержание которого колеблется от 15 до 692 г/т

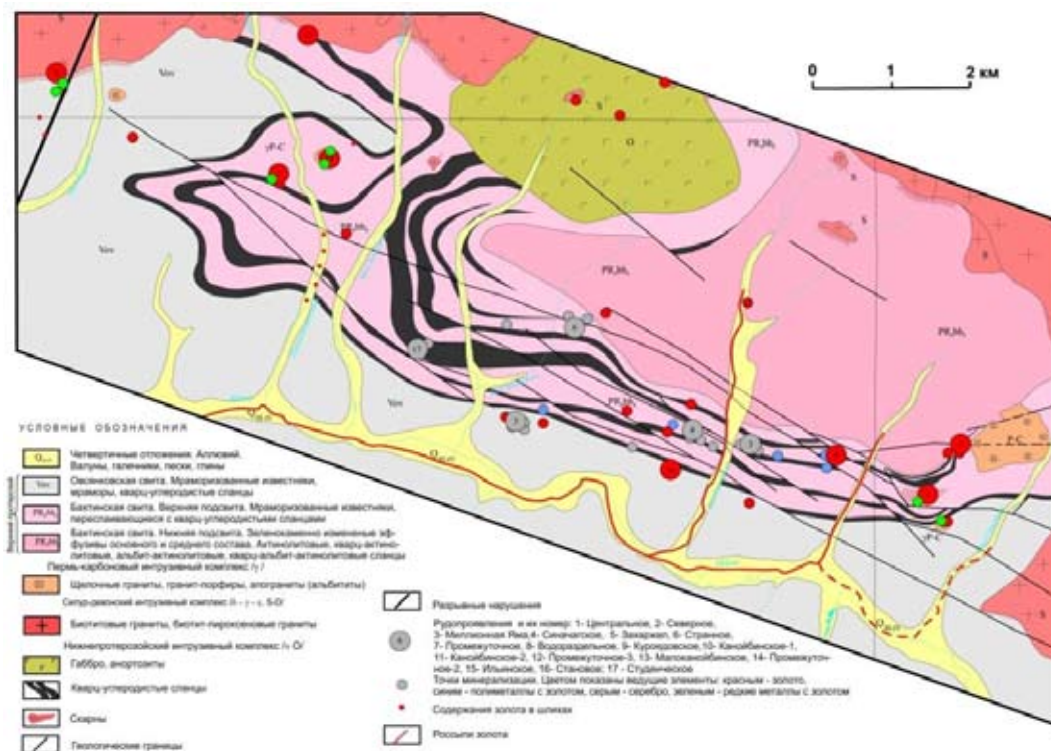


Рис. 13. Схематическая геологическая карта Верхнеманского участка (по Некос В.В., 2014, с использованием материалов Менякина А.А., 1970 и Ящук В.И., 1967)

Fig. 13. Schematic geological map of Verkhnemansky area (according to Nekos, 2014)

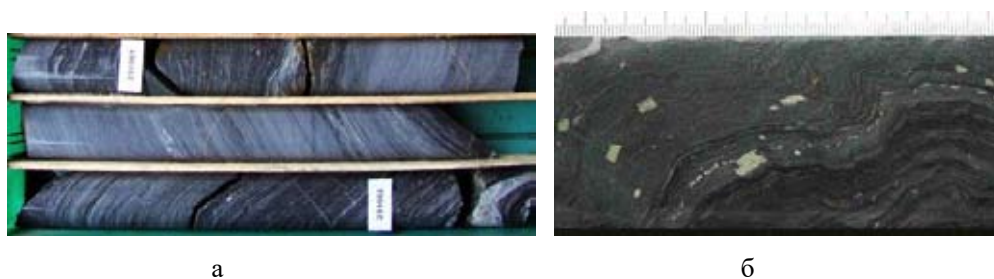


Рис. 14. Проявление Миллионная Яма. Верхнеманский участок. Восточный Саян: а – рудовмещающие углеродистые сланцы с вкрапленностью пирита. Керн поисковой скважины С-31, интервал 60,9-62,1 м; б – смятые в складки углеродистые сланцы с тонкой вкрапленностью сингенетического и крупными кристаллами метаморфогенного пирита (там же, фрагмент)

Fig. 14. Occurrence Millionnaya Yama. Verkhnemansky area. The East Sayan. а – ore-bearing carbonaceous shales with impregnation of pyrite. The core from the hole С-31, the int. 60.9-62.1 m.; б – Folded carbonaceous shales with fine impregnation of syngenetic pyrite and big crystals of metamorphic pyrite. The fragment from the same place

(в единичном случае 5476 г/т). Его среднее содержание на разных проявлениях составило от 106 (Миллионная Яма) до 138 (Захаржельское) г/т. Содержание золота в рудных интервалах варьирует от 0,14 до 3,0 г/т. Внутри серебро полиметаллических тел выделяются участки сливных сульфидных руд мощностью до 8 м, в которых количество сульфидных минералов составляет 50-75 %. Сложены они преимущественно пиритом с небольшим количеством халькопирита, галенита, сфалерита и продуктов их окисления. Содержание золота в таких образованиях от 0,5 до 8,0 г/т при среднем 2,94 г/т. На одном из участков в двух разведочных траншеях по результатам опробования были выделены два интервала с аномально высокими содержаниями Cu, Zn, V, Mo и Ag длиной 70 и 100 м. На участке Студенческом при заверке комплексной геохимической аномалии двумя линиями шурфов был вскрыт первичный ореол свинца, меди, цинка и серебра размером 150 x 300 м. Схожая аномалия была выявлена в 2005 г. и в долине руч. Станового.

К сожалению, в связи с прекращением финансирования работы ОАО «Красноярскгеология» не были завершены и участки с серебро-полиметаллической минерализацией остались не оконтуренными, как по простиранию, так и на глубину. Тем не менее полученные в 2010-2012 гг. данные прямо указывают на наличие серебро-полиметаллического оруденения в этом районе, при этом его геологические особенности свидетельствуют о наиболее вероятной принадлежности выявленного оруденения к типу SEDEX.

В 50-60 км западнее Верхнеманской рудной зоны расположено Верхне-Арзыйское серебро полиметаллическое проявление (рис. 12), которое находится в схожей геологической позиции. Оно локализовано в поле развития терригенно-карбонатных отложений протерозоя и приурочено к пачке кристаллических сланцев среди графит содержащих мраморов. В полосе северо-западного простирания 0,3-0,7x7,5 км выделено три рудные залежи, протяженностью от 130 до 500 м, мощностью от первых метров до 30-50 м. В рудах проявления содержатся Pb 0,15-4,35 %, Zn до 0,45 %, Sn 0,01-1,5 %, а также золото (более 1 г/т, максимальное 6,13 г/т). Средние содержания серебра 42,4-83,4 г/т, максимальные – 1486,5 г/т на 2,8 м и 1741 г/т на 0,45 м. Главные рудные минералы – галенит, сфалерит, пирит, халькопирит, касситерит, аргентотетраэдрит.

В пределах Дербинского антиклинория известен еще ряд серебро полиметаллических проявлений (Федоровское, Свинцовое и др), локализованных в черносланцевых горизонтах в составе терригенно-карбонатных отложений докембрийского возраста. Всех их объединяет схожий минералого-геохимический и морфологический тип оруденения, элементы стратификации, возраст и состав вмещающих пород, палеотектонические условия их формирования. В региональном плане все они находятся в пределах Дербинского антиклинория (рис. 11, 12). По этим признакам все известные на сегодня в описываемом районе Восточного Саяна Ag-Pb-Zn проявления весьма схожи с объектами SEDEX-типа, описание основных особенностей геологического строения которых было приведено выше.

Более того, докембрийский (неопротерозойский) возраст рудовмещающих отложений соответствует периоду проявления минерализации этого типа в других районах обрамления Сибирской платформы (Западное Прибайкалье, Енисейский кряж). Именно в этот период были сформированы «сибирские» стратиформные Ag-Pb-Zn месторождения в терригенных и терригенно-карбонатных толщах (SEDEX), самые крупные из которых Горевское и Холоднинское. Они образовались в пределах окраинно-континентальных прогибов, формирование которых связано с периодом рифтогенеза в ходе распада суперматерика Родинии в неопротерозое. Предполагается, что неопротерозойский рифтогенез, вызвавший распад Родинии, связан с проявлением плюмовой активности [22]. Рифтогенные процессы в это время отмечаются не только в Восточном Саяне, Енисейском кряже и Западном Прибайкалье (Олоkitском грабене), но и в других континентальных блоках, до распада составлявших единую Родинию – в Лаврентии (Северная Америка), Балтике, Амазонии, Южном Китае, Индии, Австралии [22]. Необходимо отметить, что во многих рифтогенных структурах этого возраста выявлены многочисленные и зачастую крупные месторождения SEDEX (Британская Колумбия, Швеция, Китай, Бразилия, Россия и др.) [7]. И это не случайно; как было отмечено выше, одним из важных условий образования месторождений типа SEDEX служит наличие мощного осадочного выполнения рифтовых прогибов. Именно структуры такого типа и возраста ассоциируются с Дербинским антиклинорием, расположенным в Восточном Саяне и протягивающимся в северо-западном направлении от верховьев р. Ия в Иркутской области до Енисея на 500 км.

Дербинский антиклинорий относится к структурам складчатого обрамления юго-западной части Сибирской платформы (т.н. Протеросаян) и является ее граничной структурой с Центрально-Азиатским поясом (рис. 11). Он был сформирован в условиях пассивной континентальной окраины [23], в тектоническом режиме растяжения, сопровождавшемся формированием рифтогенных прогибов. Система глубинных разломов северо-западного направления (в современных координатах), вдоль которых образовались прогибы, заполненные рудовмещающими отложениями верхнего протерозоя – рифея (неопротерозоя), долгоживущая и многократно регенерированная [21]. Об этом свидетельствует и наложенный Манский прогиб, выполненный карбонатными отложениями кембрийского возраста, в пределах которого выявлены Pb-Zn месторождения в карбонатных толщах (Лейбинский рудный узел). Подобная унаследованность наблюдается и в других районах развития месторождений SEDEX. Например, рифтогенный прогиб Селвин (Selwyn basin) в Канаде сохранял свою активность на протяжении 400 млн лет, и за этот период в его пределах образовалось более 10 разновозраст-

ных Ag-Pb-Zn месторождений с суммарными запасами руды около 16 % мировых [7]. Сходное сочетание наблюдается и в пределах Олоkitской зоны в Северном Прибайкалье, где Холоднинское месторождение SEDEX-типа в углеродистых кремнисто-карбонатно-терригенных отложениях сочетается с барит-полиметаллическим оруденением в карбонатных породах (MVT-типа) Йоко-Рыбачьего рудного поля [24]. В описываемом районе современным выражением долгоживущих глубинных разломов, вдоль которых в неопротерозое закладывались седиментационные бассейны, являются Главный Саянский, Восточно-Саянский и Манский, причем все они активны и в настоящее время [21].

Геометрические параметры Дербинской структуры (без Манского прогиба) 30-80x500 км. Для сравнения: размеры Олоkitской троговой структуры, вмещающей Холоднинское месторождение, – 25x250 км; бассейн Mount Isa – 180x500 км, бассейн Sullivan – 100x350 км. Она сложена терригенно-карбонатными отложениями позднего докембрия (саянская серия) суммарной мощности до 12 км [21], которые на крыльях структуры (Жайминский и Саянский прогибы) надстраиваются терригенно-карбонатно-вулканогенными образованиями кувайской серии рифея. Последняя имеет мощность 3-5 км и некоторыми исследователями выделяется в отдельный рифтогенный комплекс [21, 25]. Возраст осадочных отложений саянской серии на основании изотопно-геохронологических и литогеохимических исследований оценивается как неопротерозойский (1000-500 млн лет) [26]. В составе обеих серий среди существенно карбонатных пород выделяются горизонты и пачки терригенных отложений с высоким содержанием углеродистого вещества (0,5-2,87 %, максимальное – 7,21 %) и тонкой сингенетичной вкрапленностью пирита или пирротина [25]. В основном именно в них или на их контакте с карбонатными породами локализованы известные на сегодня в описываемом районе проявления Ag-Pb-Zn минерализации. Такая приуроченность оруденения к терригенно-осадочным горизонтам, обогащенным углеродом, характерна для многих месторождений SEDEX, и это является одним из главных их отличий от месторождений MVT-типа, в которых Ag-Pb-Zn-оруденение локализовано исключительно в карбонатных породах.

Метаосадочная толща содержит горизонты вулканитов, среди которых преобладают породы основного состава [25]. Такая ассоциация терригенно-карбонатных и вулканогенных пород, высокий уровень метаморфизма и повышенные содержания золота в рудах характерны для месторождений SEDEX подтипа Broken Hill (БНТ). Как известно, в рудах месторождения Broken Hill среднее содержание золота 0,47 г/т, что с учетом значительных объемов рудной массы (280 млн т) позволяет отнести его к категории крупных объектов и по золоту (более 100 т). Здесь уместно напомнить, что в 80-х гг. прошлого века именно участки развития докембрийских углеродистых толщ Восточного Саяна в «...зонах Главного и Восточно-Саянского разломов» рекомендовались КО СНИИГГиМС (Л.В. Ли, В.М. Ярошевич, В.М. Даценко и др.) для постановки работ «...по выявлению золотого оруденения типа сульфидно-прожилково-вкрапленных зон». Установлено, что такие участки отличаются насыщенностью вторичными ореолами золота, серебра, свинца, цинка, висмута, мышьяка, молибдена, а также наличием россыпных месторождений золота (рис. 12, 13). Например, суммарная добыча россыпного золота в районе Верхнеманского участка, по данным В.В. Некос, составила около 3 т.

Пластообразная и линзовидная формы рудных залежей, их стратифицированность, небольшая мощность рудных тел (от первых метров до 30 м на фоне общей многокилометровой

толщи вмещающих отложений) создают определенные трудности на начальных этапах поисков месторождений этого типа в закрытых районах, к которым относится и Восточный Саян. Сложность поисковых работ усугубляется еще и тем, что главные рудные минералы (пирит, пирротин, галенит, сфалерит) не образуют при окислении в поверхностных условиях ярких вторичных минералов, а зоны гидротермальных изменений, как правило, не контрастные и на начальных стадиях исследований не всегда могут быть идентифицированы. Однако эти и другие сложности, имеющие геологическую природу, являются неотъемлемой составляющей при поисках месторождений любого промышленно-генетического типа, и задача специалистов-геологов решить их. При этом, как уже было сказано, необходимо использовать генетическую модель типоморфного месторождения. В данном случае это месторождение типа SEDEX, или стратиформное Ag-Pb-Zn-месторождение в терригенных и терригенно-карбонатных толщах (по отечественной терминологии).

Заключение

Подводя итог вышеизложенному, надо отметить, что территория Красноярского края имеет хорошие перспективы по увеличению минерально-сырьевой базы полиметаллов и серебра. Более того, на сегодня эти перспективы лучшие в России в силу объективных геологических причин: в пределах территории края находится основная часть складчатого обрамления Сибирской платформы, с которой пространственно и генетически связан Сибирский полиметаллический пояс. Географически это Таймырский, Ангарский и Восточно-Саянский районы. При этом доступность и наличие инфраструктуры выгодно отличают Восточно-Саянский перспективный район от двух других. Эта территория находится на юге края, в северо-западной части Восточного Саяна. Здесь уже существует довольно развитый горнорудный район, выросший на базе железорудных месторождений (Краснокаменское, Ирбинское и др.), рудных и россыпных месторождений золота (Ольховско-Чибихевский, Манский, Сисимский и другие районы); сравнительно недавно здесь выявлено Кингашское Cu-Ni-месторождение. И хотя на текущий момент в Восточно-Саянском районе не известно ни одного промышленного серебро полиметаллического месторождения, анализ имеющихся материалов по его геологическому строению в совокупности с выявленным в последнее время нетрадиционным для этого района типа оруденением, дает серьезное основание для прогнозирования в его пределах промышленного Ag-Pb-Zn-оруденения SEDEX-типа. Как уже было сказано, месторождения этого типа относятся к комплексным и служат основным источником Zn, Pb и Ag в мире. Кроме того, в пределах всех изученных на сегодня проявлений этого нового для Восточного Саяна типа оруденения есть участки с повышенным содержанием золота, что существенно увеличивает их потенциальную ценность.

Таким образом, Красноярский край имеет реальную возможность стать не только ведущим продуцентом золота, платиноидов, меди, никеля и свинца в России, но и новым важным центром производства серебра. Все геологические предпосылки и прямые поисковые признаки в виде уже установленных Ag-Pb-Zn-проявлений дают серьезные основания для такого прогноза. В заключение следует еще раз напомнить, что «...до открытия Холоднинского месторождения металлогенические перспективы Северного Прибайкалья оценивались невысоко и толщи докембрия, имеющие здесь широкое развитие, считались малоблагоприятными для выявления

крупных месторождений цветных металлов» [14]. Сейчас Холоднинское – одно из крупнейших в мире Ag-Pb-Zn-месторождений.

Список литературы

- [1] Ставский А.П. *Минеральное сырье: от недр до рынка: в 3 т. Т. 2. Цветные металлы. Алюминий, медь, олово, свинец, цинк*. М., Научный мир, 2011, 496 с. [A.P. Stavsky. *Minerals from the subsoil to the market: v. 2. Non-ferrous metals. Aluminum, copper, tin, lead, zinc*. M., Science World, 2011, 496 p. (in Russian)]
- [2] *Минеральные ресурсы мира*. Статистика. М., ООО «Сам Полиграфист», 2012, 146 с. [Mineral resources of the world. Statistics. M., LLC «The printer itself is» 2012, 146 p. (in Russian)]
- [3] Goodfellow W.D. and Lydon J.W. Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, *District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication* 2007, 5, 163-183.
- [4] Иванов А.И., Вартанян С.С., Черных А.И., Волчков А.Г., Кузнецов В.В., Серавина Т.В. Состояние и перспективы развития МСБ меди, цинка и свинца России. *Разведка и охрана недр*, 2016, № 9, с. 100-106. [Ivanov A.I., Vartanyan S.S., Chernyh A.I., Volchikov A.G., Kuznetsov V.V., Seravin T.V. State and prospects of MSB copper, zinc and lead of Russia. *Exploration and protection of ores*, 2016, 9, 100-106. (in Russian)]
- [5] Кривцов А.И., Минина О.В., Волчков А.Г., Абрамова Е.Е., Гричук Д.В., Ельянова Е.А. *Месторождения колчеданного семейства*. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов.: М., ЦНИГРИ, 2002, 282 с. [Krivtsov A.I., Minin O.V., Voltchikov A.G., Abramova E.E., Grichuk D.V., Elyanova E.A. *VMS deposits*. Series: Models deposits of precious and nonferrous metals. M., TsNIGRI, 2002, 282 p. (in Russian)]
- [6] Lobanov K.V., Yakubchuk A.S. and Creaser R.A. Besshi-Type VMS Deposits of the Rudny Altai (Central Asia), *Economic Geology*, 2014, 109, 1403–1430.
- [7] Дергачев А.Л., Еремин Н.И. Соотношение вулканогенного колчеданного и стратиформного свинцово-цинкового оруденения в истории Земли. *Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 2008, 4, 26-34. [Dergachov A.L., Eremin N.I. The ratio of VMS and stratiform lead-zinc mineralization in the history of the Earth. *West. Moscow University. Ser. 4. Geology*, 2008, 4, 26-34. (in Russian)]
- [8] Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г. *Гидротермальный рудогенез океанического дна*. М. Наука, 2006. 527 с. [Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. Institute of Oceanology, after P.P. Shirshov. *Hydrothermal ore genesis of the ocean floor*. Moscow, Science, 2006, 527 (in Russian)]
- [9] Large R.R., Bull S.W., McGoldrick P.J., Walters S., Derrick G.M. and Carr G.R. Stratiform and stratabound Zn-Pb-Ag deposits in Proterozoic sedimentary basins, northern Australia. *Society of Economic Geologists*, 2005, 931–963.
- [10] Leach D.L., Sangster D.F., Kelley K.D., Large R.R., Garven G., Allen C.R., Gutzmer J. and Walters S. Sediment-hosted lead-zinc deposits; a global perspective, in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005*: Littleton, CO, *Society of Economic Geologists*, 2005, 561–607.

[11] Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer Science + Business Media B.V., 2009, 1250 p.

[12] Ковалев К.Р. *Гидротермально-осадочный рудогенез на колчеданно-полиметаллических месторождениях Забайкалья и преобразование руд при различных типах метаморфизма*. Автореф. дис. ... д-ра. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1994, 95 с. [Kovalev C.R. *Hydrothermal-sedimentary ore genesis in the pyrite-polymetallic deposits of Transbaikalia and the transformation of ores in different types of metamorphism*. D.Sc. abstract, Novosibirsk, 1994, 95 p. (in Russian)]

[13] Акимцев В.А. *Минералого-геохимические особенности и условия формирования стратиформных полиметаллических руд Ангарского рудного района (Енисейский кряж)*. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1992, 42 с. [Akimtsev V.A. *Mineralogical and geochemical features and conditions of formation of stratiform polymetallic ores Angarsk ore district (Yenisei Ridge)*. Ph.D. abstract, Novosibirsk, 1992, 42 p. (in Russian)]

[14] Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Тарасова Р.С. и др. *Холоднинское колчеданно-полиметаллическое месторождение в докембрии Прибайкалья*. Новосибирск, Наука, 1982. 208 с. [Distanov E.G., Kovalev C.R., Tarasov R.S. et al. *Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit in the Precambrian of the Baikal region*. Novosibirsk, Nauka, 1982. 208 p. (in Russian)]

[15] Дистанов Э.Г. *Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири*. Новосибирск, Наука, 1977, 351 с. [Distanov E.G. *Pyrite-polymetallic deposits in Siberia*. Novosibirsk, Science, 1977, 351 p. (in Russian)]

[16] Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А. *Геология месторождений серебра*. Якутск, 2003, 282 с. [Konstantinov M.M., Kostin A.V., Sidorov A.A. *Geology of silver deposits*. Yakutsk, 2003, 282 p. (in Russian)]

[17] Костин А.В. *Серебряные месторождения Западного Верхоянья*. Автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук. Якутск, 2001, 43 с. [Kostin A.V. *Silver deposits West Verkhoyanye*. D.Sc. abstract, Yakutsk, 2001, 43 p. (in Russian)]

[18] Еханин А.Г., Курбатов И.И., Шибистов Б.В. Ресурсная минерально-сырьевая база цветных и редких металлов Красноярского края. *Природные ресурсы Красноярского края*, 2010, 8, 5-11. [Ehanin A.G., Kurbatov I.I., Shibistov B.V. The mineral resource base of non-ferrous and rare metals Krasnoyarsk Territory. *Natural resources of the Krasnoyarsk Territory*, 2010, 8, 5-11 (in Russian)]

[19] Чесноков Б.П., Богданович Т.В. *Цветные металлы Центральной Сибири*. Музей геологии Центральной Сибири, Красноярск, 2005, с. 103. [Chesnokov B.P., Bogdanovich T.V. *Non-ferrous metals in Central Siberia*. Geology Museum of Central Siberia, Krasnoyarsk, 2005, p. 103. (in Russian)]

[20] <http://www.vsegei.ru/ru/info/>

[21] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-46-Абакан. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008, с. 391. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). A series of Altai-Sayan. N-46-Abakan. Explanatory text. SPb.: VSEGEI Cartographic factory, 2008, p. 391. (in Russian)]

[22] Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Гренвилские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона. *Геотектони-*

ка, 2014, 5, 32–53. [Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Kozlov P.S. Grenvilskie tectonic events and the evolution of the Yenisei Ridge, the western margin of the Siberian craton. *Geotectonics* 2014, 5, 32-53. (in Russian)]

[23] Metelkin D.V., Vernnikovsky V.A., Kazansky A.Yu. *Siberia – from Rodinia to Eurasia*. Tectonics, 2011, 370 p.

[24] Рыик Е.Ю. *Факторы контроля стратиформных свинцово-цинковых месторождений Олоkitской зоны (Северное Прибайкалье)*. Автореферат дисс....канд. геол.-мин. наук. Ленинград, 1991, 30 с. [Ryik E.Y. *Control factors stratiform lead-zinc deposits Olokit zone (northern Baikal region)*. Ph.D. abstract, Leningrad, 1991, 30 p. (in Russian)]

[25] Ярошевич В.М., Корнев Т.Я., Кунгурцев Л.В. *Кувайский эталон кувайского базальтоидного комплекса (Восточный Саян)*. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1995, с. 148. [Yaroshevich V.M., Kornev T.Y., Kungurtsev L.V. *Kuvaysky standard kuvayskogo basaltoid complex (Eastern Sayan)*. Novosibirsk SNIIGGiMS, 1995, p. 148. (in Russian)]

[26] Ножкин А.Д., Туркина О.М., Дмитриева Н.В., Летникова Е.Ф., Овчинникова Г.В., Каурова О.К. Метатерригенно-карбонатные отложения и гранитоиды Дербинского блока (Восточный Саян): петрогеохимический состав, изотопно-возрастные рубежи и условия формирования. *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания (Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 17-20 октября 2012 г.)*, Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2012, вып. 10, т. 2, с. 30-32. [Nozhkin A.D., Turkin O.M., Dmitrieva N.V., Letnikova E.F., Ovchinnikov G.V., Kaurova O.C. Metaterrigenous-calcareous sediments and granitoids of Derbinskoi block (East Sayan): Geochemical composition, isotope-age boundaries and formation conditions. *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent): Proceedings of the meeting (Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, October 17-20, 2012)*, Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, SO RAS, 2012 v. 10-2, p. 30-32. (in Russian)]